

SIMULACIÓN TRIDIMENSIONAL DE UNA CÁMARA DE COMBUSTIÓN EXPERIMENTAL PARA OBTENER LOS CAMPOS DE VELOCIDAD, PRESIÓN Y TEMPERATURA, MEDIANTE EL SOFTWARE CFX 5.6

Luis. D. Mendoza

Laboratorio de investigación de termofluidos. Decanato de investigación. Universidad Nacional del Táchira. San Cristóbal. Venezuela.

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación es predecir los campos de velocidad, presión y temperatura en una cámara de combustión experimental, mediante la técnica de la simulación numérica de flujo de fluidos. Para ello se revisa el procedimiento de solución numérica de las ecuaciones de transporte, aplicadas a la cámara de combustión experimental. La simulación está basada en el software CFX 5.6, el cual fue adquirido por la universidad nacional experimental del Táchira por medio del Decanato de Post-grado y de Investigación. Se hace un estudio de la sensibilidad de malla para adecuar el criterio de convergencia que el software requiere. La cámara de combustión experimental empleada para éste estudio es una cámara de combustión diseñada por estudiantes de Pre-grado para determinar la temperatura de flama adiabática, aunque el diseño de esta cámara no es estándar, es útil para medir la temperatura en tiempo real. El combustible empleado para éste análisis es propano (C_3H_8) el cual es inyectado a la cámara de combustión por una tubería concéntrica al flujo de aire. En la solución de la simulación computacional se aprecia, a través del perfil de temperatura, la envolvente de la llama, formada por el contorno de temperatura máxima, la cual es similar a la observada en cualquier cámara de combustión.

INTRODUCCIÓN

La finalidad de una cámara de combustión es conseguir una combustión lo más completa posible y de manera instantánea de una mezcla aire – combustible, generando una cantidad de energía en el proceso, para su posterior uso.

En los actuales momentos el estudio de campos de flujos mediante el uso de la simulación numérica computacional ha adquirido gran relevancia en la optimización de equipos. Puesto que algunos parámetros físicos que intervienen en las cámaras de combustión, como la velocidad del flujo de aire, velocidad de flujo de combustible, presión, turbulencia, temperatura, entre otros, influyen en su desempeño y deben ser considerados en el diseño; por lo tanto se plantea la simulación numérica mediante el análisis computacional de la dinámica de fluidos CFD, por sus siglas en inglés (Computational Fluid Dynamics), para predecir los campos de velocidad, presión y temperatura[1].

EL PROCESO DE COMBUSTIÓN

En el estudio de la combustión, las reacciones químicas desempeñan un papel fundamental. Se desarrolla de manera muy compleja, ya que la reacción exotérmica se produce junto con el movimiento del fluido, la elevación de la temperatura y la variación de las concentraciones de especies químicas. Las ecuaciones básicas de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía controlan el proceso. Las reacciones químicas ocurren muy rápidamente, la mezcla del combustible y el oxidante constituye el factor determinante para la ocurrencia de la reacción de combustión.

La oxidación de un hidrocarburo en presencia de aire, involucra aproximadamente 30 reacciones y 14 especies químicas. La combustión real es un proceso complejo, por lo cual, se estudia a través de modelos matemáticos, basados en la experiencia física y el equilibrio de las reacciones químicas. Dichos modelos consisten en ecuaciones algebraicas, diferenciales o integrales, pudiendo ser éstos modelos simples o complejos.

Los modelos simples consideran el fenómeno de combustión real con cientos de iteraciones de reacciones químicas, y en forma general puede ser descrito como:

- Un fenómeno en el cual desaparece oxígeno y combustible.
- Aparece dióxido de carbono y agua.
- La temperatura aumenta y/o produce calor.

Los modelos más complejos describen el proceso de combustión basado en la teoría cinética de las reacciones químicas. Actualmente se han propuesto varios modelos de combustión, entre los cuales se encuentra: Sistema de reacción química simple, modelo de reacción bimolecular de choques controlados, modelo termodinámico y cinética de las reacciones y modelo de combustión integral. De los cuales se derivan [1]:

- Modelo de reacción instantánea.
- Modelo de reacciones en equilibrio químico.
- Modelo de reacción de FROZEN.
- Modelo químico de depósitos de vapor.
- Modelo tasa finita de reacción.

GENERALIDADES DEL MODELO DE ANÁLISIS.

El modelo que se pretende analizar consiste en una cámara de combustión experimental, la cual fue desarrollada por estudiantes de Pregrado para medir la temperatura de flama adiabática. Aunque cabe decir que este modelo en particular no es estándar en los diseños de cámaras de combustión, se presta para poder realizar ensayos experimentales en tiempo real, ya que tiene la particularidad de trabajar con combustible líquido o gaseoso. Para lograr la simulación computacional, se hizo necesario emplear tres modelos computacionales, los cuales se refieren a la geometría original, es decir, la configuración real de la cámara de combustión; a una geometría modificada, la cual consistió en alargar la salida de los gases producto de la combustión, para que hiciera la función de una chimenea y la configuración final, que consistió en modificar la salida de la cámara de combustión a una chimenea de mayor área, con la finalidad de disminuir la velocidad de salida de los gases producto de la combustión y de esta manera lograr una mejor convergencia del software. Ver figura 1, 2 y 3

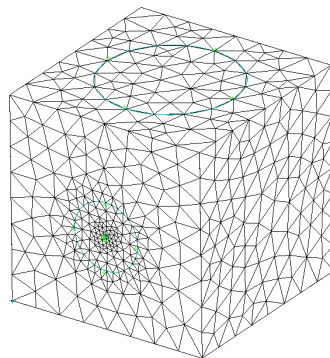


Fig.1 Geometría original

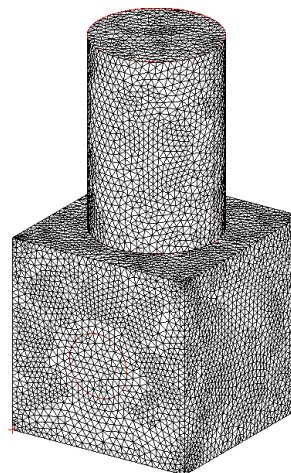


Fig.2 Geometría modificada

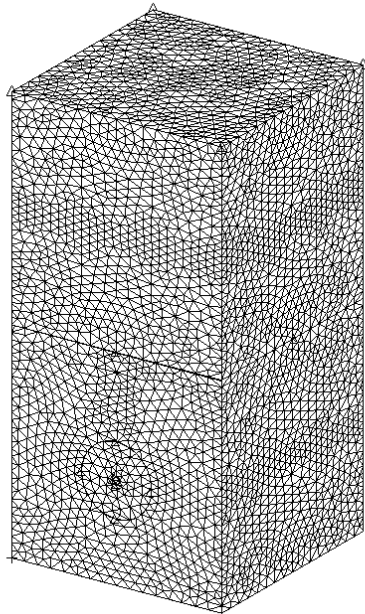


Fig.3 modificación final

La generación de la malla es una parte fundamental para obtener una solución adecuada a la realidad, y depende en gran medida de la complejidad geométrica del modelo, un modelo más complejo traerá consigo una densidad de malla mayor (mayor número de elementos o volúmenes de control) y esto a su vez trae como consecuencia un tiempo de cómputo muy alto.

El software CFX 5.6 genera una densidad de malla no estructurada por defecto, es decir, según la geometría y el tamaño de la menor dimensión del modelo, el software genera un tamaño de elemento o volumen de control, y a partir de ese valor se genera la densidad de malla. Es aquí donde la técnica y la experiencia del investigador se combinan para generar la densidad de malla óptima, capaz de generar respuestas ajustadas a la realidad, sin sacrificar tiempo de cómputo y la capacidad de la computadora.

Para obtener una densidad de malla adecuada, se plantea, en esta investigación, un estudio preliminar de un flujo de aire turbulento incompresible a través de la cámara de combustión. Este análisis permite refinar la malla de manera sencilla puesto que se evita el análisis de otras variables como la distribución de

temperatura, especies químicas e intensidad de calor propias de los procesos de combustión. Cabe destacar que el análisis final de esta investigación involucra las variables propias del proceso de combustión. La técnica planteada, consiste en refinar la malla con un fluido sencillo, en flujo incompresible y turbulento de manera tal que el proceso cumpla con la ecuación de continuidad. A medida que se logre cumplir con la ecuación de continuidad se logrará el refinamiento de malla adecuado, pues la obtención de la densidad de malla está relacionada con la geometría del modelo y el cumplimiento de la ecuación de continuidad depende en cierta forma de la densidad de malla.

El análisis del modelo comienza tomando como condición de borde, que el flujo se encuentra en régimen permanente. La ecuación de continuidad, para este caso en particular, sugiere que el flujo másico en la entrada debe ser igual al flujo másico en la salida. Tal como se muestra en la E.C. 1

$$0 = \frac{\partial}{\partial t} \int \rho dV + \int \rho \vec{V} d\vec{A} \quad (1)$$

Ahora el flujo másico se define como:

$$m = \rho VA \quad (2)$$

Por lo tanto se cumple qué:

$$\rho VA = \rho VA \quad (3)$$

Para desarrollar el planteamiento matemático se debe tener las siguientes consideraciones en el modelo:

- El fluido es aire estándar.
- El fluido fluye según el régimen turbulento.
- El fluido es incompresible.
- El flujo es estable.
- El área de la entrada y salida son conocidas, según la geometría del problema.
- La velocidad del flujo de aire a la entrada es conocida. En este análisis se tomó 5 m/s para evitar problemas de reflujo o contraflujo en la simulación.

Por consiguiente:

Área de entrada $A_e = 0.007854 \text{ m}^2$
 Área de salida $A_s = 0.0314149 \text{ m}^2$

Velocidad de entrada $V_e = 5 \text{ m/s}$

Velocidad a la salida, según la ecuación 3 es $V_s = 1.25 \text{ m/s}$.

ESTUDIO DE SENSIBILIDAD DE MALLA

Para el análisis se toman varios parámetros bien sean cuantitativos o cualitativos, como son velocidad y área a la salida, tiempo computacional, visualización de líneas de corriente, contornos, entre otros [2].

El análisis de la densidad o sensibilidad de malla se hizo en función de la geometría modificada, pues para lograr una buena convergencia se requiere que el fluido esté lo bastante desarrollado a través del modelo. El análisis de la sensibilidad o densidad de malla comienza en el **CFX-Build** y en el mismo se puede modificar las condiciones para mejorar la malla. Estas modificaciones se refieren al tamaño máximo del elemento (Maximun Edge Length) y al estrechamiento de los elementos en cada dirección coordenada (Streth) [3].

A continuación se mostrará una tabla de las mallas utilizadas para el análisis, reflejando el máximo número del elemento (Maximun Edge Length), así como el estrechamiento (Streth).

Tabla 1 Densidad de mallas

Malla	Longitud máxima del elemento	Streth x,y,z	Total de elementos	Total de nodos
MALLA1	0.0286364	0,0,0	56416	11264
MALLA2	0.015	0,0,0	119873	22607
MALLA3	0.01	0,0,0	372687	67791
MALLA4	0,02	2,2,3	548159	99053
MALLA5	0.02	2.5,2.5,3.5	996904	178170

Se presenta ahora una tabla resumen de los valores obtenidos mediante el software CFX 5.6, en función del refinamiento de malla. Esta tabla presentará los valores de la velocidad W , así como el área en la salida del modelo, los cuales se compararán con los valores obtenidos por las ecuaciones matemáticas. Estos valores se obtienen en el **CFX- Post**.

Cabe recordar que de los análisis anteriores se tiene una velocidad teórica de entrada de 5 m/s y de salida igual a 1.25 m/s . así como un área de salida de 0.0314149 m^2 .

Tabla 2 Parámetros de comparación

Malla	Velocidad W	Área de salida	CPU time
MALLA1	1.22558	0.0312286	8" 4.266
MALLA2	1.22888	0.0312286	16" 28.922
MALLA3	1.25117	0.0313655	48" 24.609
MALLA4	1.25031	0.0313655	1' 10" 20.219
MALLA5	1.25168	0.0313655	2' 9" 3.750

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Los resultados del análisis de sensibilidad de malla se pueden ver gráficamente en la figura 4; en la misma, se visualiza que los resultados esperados van mejorando a medida que se vaya refinando la malla; de hecho, se demuestra, que a mayor refinamiento, mayor será el tiempo de cómputo. De igual

modo se puede observar que la malla inicial, la que se genera por defecto, siempre es una malla gruesa, es decir, con muy poca densidad, y la misma no arroja resultados ajustados a la realidad.

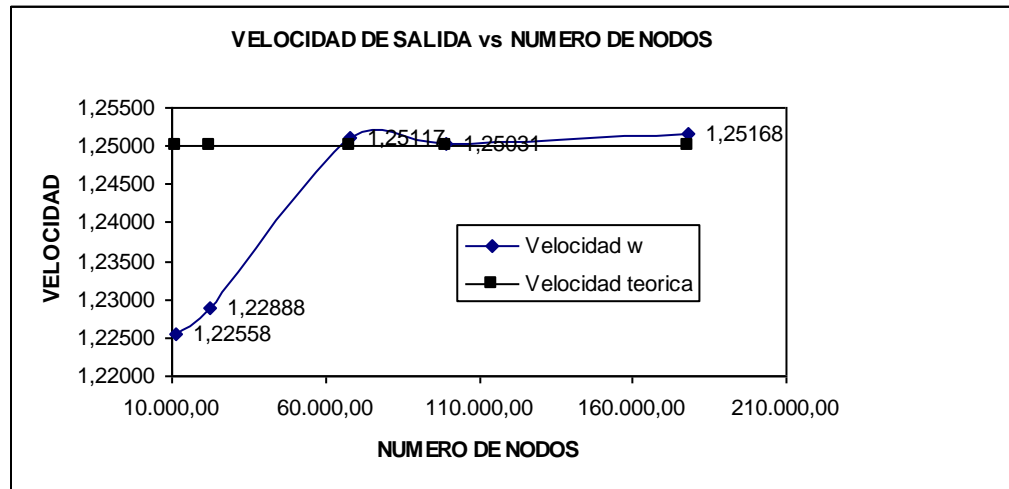


Fig. 4 Gráfica de velocidad vs número de nodos

De lo anterior expuesto se concluyó que la malla adecuada para este análisis es la malla 4, ya que se adaptó mejor a los resultados esperados, cumpliendo las condiciones de continuidad.

Para crear las condiciones de borde en software CFX 5.6 se requiere conocer muy bien el proceso real. Las condiciones de borde producen diversas soluciones para una geometría y un sistema dado de modelos físicos, de tal manera que las condiciones de borde determinan en alto grado una buena solución computacional. Para la cámara de combustión analizada se consideró el aire con cierta cantidad de humedad. Las medidas realizadas dieron como resultado una humedad relativa de aproximadamente de 73% y una presión barométrica de 90 KPa. Por lo tanto la humedad absoluta (ω) es de 0,0164103 Kg de vapor de agua por Kg de aire seco. La fracción másica de agua dio como resultado 0,2292372 y la de oxígeno 0,0162224 respectivamente. Luego se determinó la velocidad con que ingresa el combustible a la cámara de combustión (salida del inyector) así como la velocidad de entrada del aire con un anemómetro de hilo caliente. Estas velocidades son: Para el aire 10 m/s. Para el combustible 30 m/s.

Campo de velocidad

En la figura 5 se observa la velocidad en el plano YZ. La velocidad mayor se observa precisamente a la altura del inyector. Se observa que la velocidad disminuye a medida que se aleja del inyector y se hace cero en las paredes de la cámara de combustión. Se observa de igual manera que la velocidad es menor a la salida, siendo congruente el resultado obtenido con la modificación final.



Fig.5 Campo de velocidades

Se observa la recirculación y esto es debido al poco espacio dentro de la cámara de combustión.

Campo de presión

En la figura 6 se observa como cae la presión a medida que el flujo se aleja del inyector, y esto es debido a la expansión brusca que se produce dentro de la cámara de combustión. De igual manera se observa como vuelve a incrementarse la presión a medida que se aproxima a la pared, producto de la disminución de la velocidad del fluido.

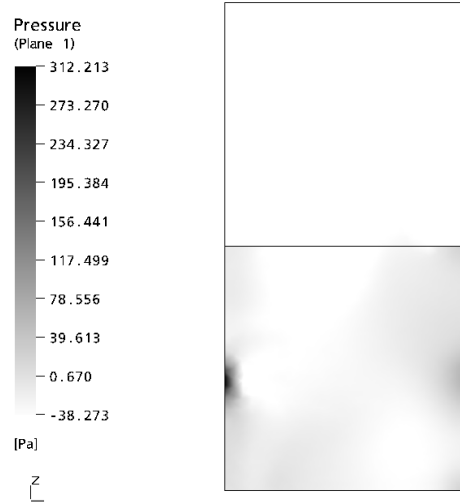


Fig. 6 Campo de presiones

Energía cinética turbulenta

En la figura 7 se puede observar como se distribuye la energía cinética turbulenta dentro de la cámara de combustión. Se visualiza que la energía cinética turbulenta es mayor en la pared donde choca la llama, lo cual es de esperarse, pues producto de este choque se produce una gran recirculación. También se observa que en el fondo de la cámara de combustión se incrementa la energía cinética turbulenta, al igual que en la zona donde comienza a ascender los gases producto de la combustión.

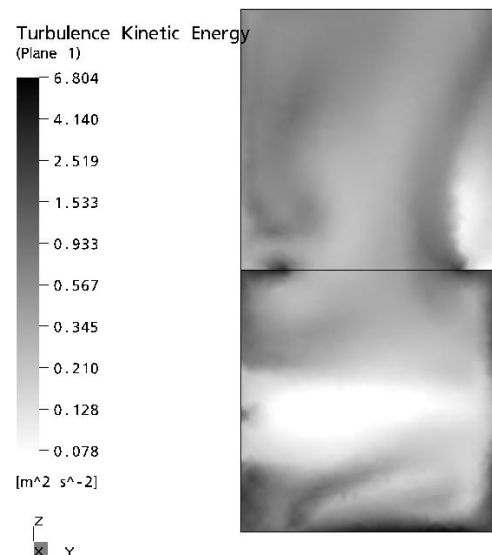


Fig. 7 Energía cinética turbulenta

Disipación de energía turbulenta

La energía turbulenta se produce a medida que los remolinos van disminuyendo de tamaño según la microescala de Kolmogorov, este efecto se puede ver en la figura 8 y como es de esperarse los valores más altos de la disipación de la energía turbulenta se da en la pared donde choca la llama, pues es allí donde se comienza a formar los remolinos y a medida que el flujo se regresa, los valores de la disipación de la energía turbulenta disminuyen.

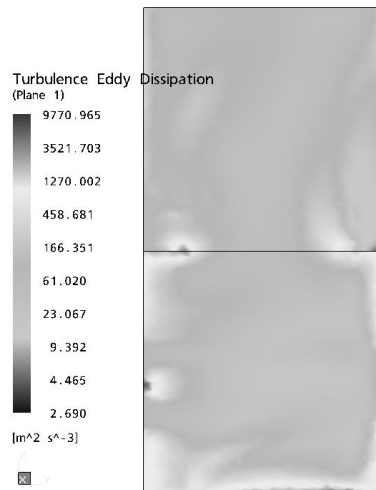


Fig.8 Disipación de energía turbulenta

Temperatura

En la figura 9 se muestra la distribución de temperatura dentro de la cámara de combustión. Como es de esperarse la llama choca con la pared debido al pequeño espacio disponible dentro de la cámara de combustión. También se observa que la llama se desvía hacia arriba, así como la tendencia de la envolvente de la llama a posicionarse en la parte superior de la cámara de combustión, debido a la recirculación que el flujo produce al chocar con la pared. Se aprecia el posicionamiento de la envolvente de la llama, así como la distribución de la temperatura en el dominio del modelo. También se puede apreciar como se eleva la temperatura en las zonas donde se produce mayor recirculación del flujo, lo cual se evidencia en la configuración real.

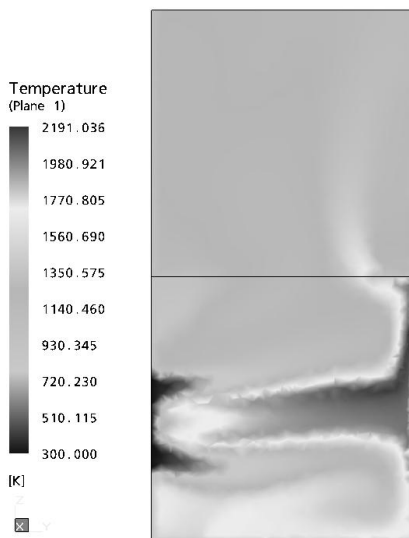


Fig. 9 Temperatura

Concentración de especies químicas

Los perfiles de concentración de las especies químicas involucradas (Propano, oxígeno, dióxido de carbono, agua, nitrógeno) siguen el contorno de la envolvente de la llama. La concentración de propano es máxima a la entrada de la cámara y comienza a disminuir dentro de la llama, en cuya región ocurre la combustión, fuera de la envolvente de la llama la concentración del propano es cero. Ver figura 10. La concentración de oxígeno sigue un patrón completamente contrario al del propano, fuera de la envolvente de la llama el valor es el máximo (0.232), el cual es el valor correspondiente a la concentración del oxígeno en el aire. Dentro de la envolvente la concentración es mínima. Ver figura 11. La concentración de los demás productos sigue este comportamiento, se incrementa la concentración de agua y dióxido de carbono en la región donde ocurre la reacción del propano y el oxígeno. Ver figuras 12 ; 13 y 14.

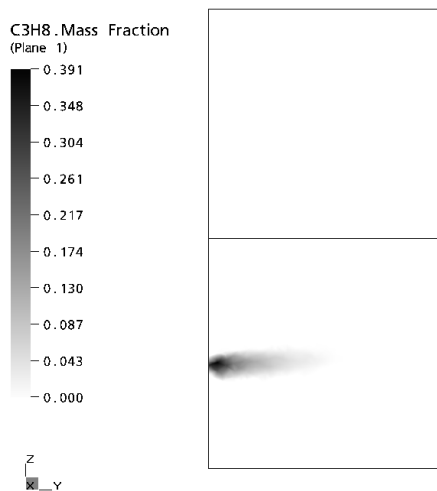


Fig.10 Concentración de propano

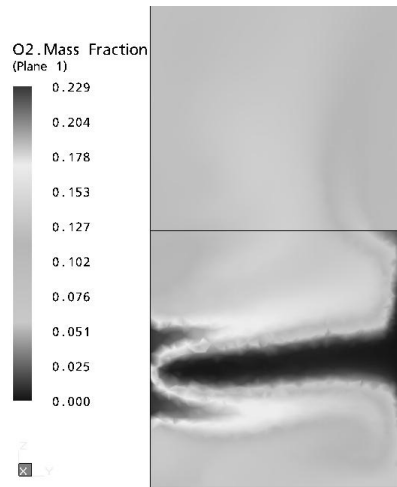


Fig.11 Concentración de oxígeno

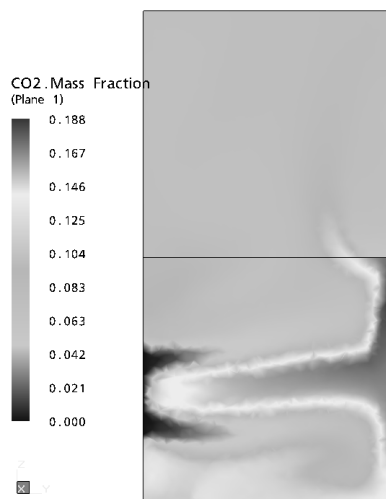


Fig.12 Concentración de dióxido de carbono

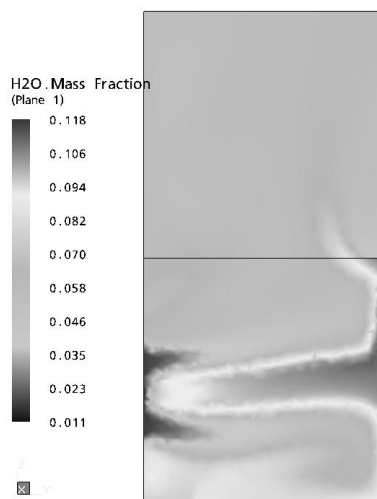


Fig.13 Concentración de agua

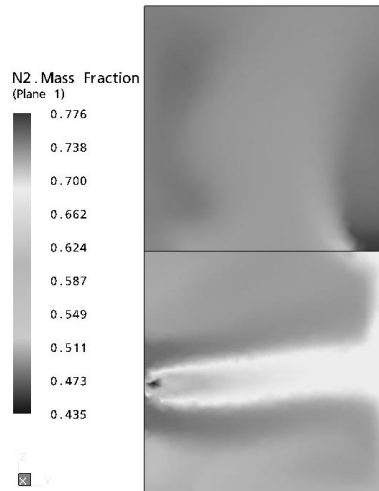


Fig.14 Concentración de nitrógeno

El modelo con la modificación final demuestra, en forma cualitativa, los valores y tendencias reales de la cámara de combustión estudiada en este trabajo. Es importante acotar que no basta con hacer un estudio detallado del refinamiento de malla, sino que para el software CFX 5.6 también es importante ajustar las condiciones de borde reales al modelo computacional, para de esta manera obtener resultados ajustados a la realidad. Seguidamente se mostrará una serie de figuras que contribuyen a demostrar que el modelo computacional se aproxima a la realidad. La primera corresponde a la tendencia de la llama según el CFX 5.6 y la otra imagen al comportamiento real de la llama.

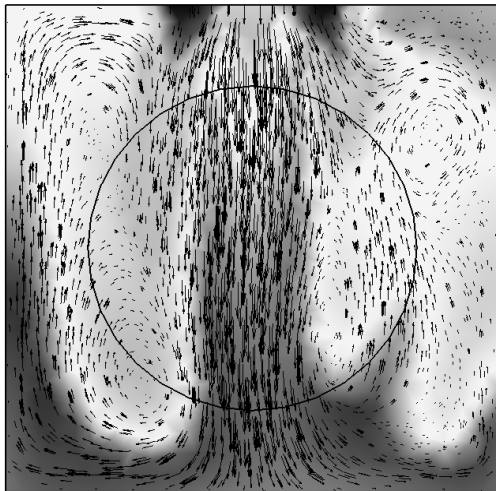


Fig. 15 Llama según campo de vectores



Fig.16 Llama real

CONCLUSIONES

- 1) Para obtener un modelo confiable y que se ajuste a la realidad, es necesario hacer una validación de la malla de manera sistemática para cada geometría en particular.
- 2) El estudio de sensibilidad de malla permitió conocer la influencia que tiene el tamaño de la malla en la solución del campo de flujo. A medida que decrece el espaciamiento de malla (longitud de los elementos), se obtiene una mejor distribución de las variables que intervienen en la definición de los campos de velocidad, presión y cantidades de turbulencia, aunque esto no quiere decir que una malla muy fina sea la ideal, ya que aquí se asocia un aumento considerable en el tiempo computacional, que puede arrojar divergencia en la solución numérica.

- 3) La densidad de malla depende en gran medida de la complejidad de la geometría del modelo. Por lo que es necesario hacer un control de la malla en las zonas de mayor interés
- 4) Las ecuaciones de la mecánica de fluidos (ecuaciones gobernantes) pueden converger matemáticamente con especificar adecuadamente las condiciones de borde para el modelo computacional.
- 5) Las condiciones de borde producen diversas soluciones para una geometría y un sistema dado de modelos físicos, por lo cual las condiciones de borde determinan en alto grado una buena solución computacional. En este trabajo se hizo necesario determinar experimentalmente las velocidades de entrada, tanto para el aire como para el combustible, y se llevó a cabo mediante un anemómetro de hilo caliente. De igual manera se determinó la humedad presente en el aire atmosférico, el cual usa la cámara de combustión para realizar la mezcla aire – combustible.
- 6) El modelo computacional con la modificación final, es el que mejor se adecuó a la situación real y por consiguiente es el que presenta mejores resultados. El modelo real no tiene chimenea y por consiguiente la velocidad en la salida es relativamente baja. Con el modelo previamente modificado, los resultados computacionales describen un aumento de la velocidad en la salida, por lo cual se incrementa el tiempo computacional sin satisfacer los criterios de convergencia. El modelo con la modificación final describe, cualitativamente, el comportamiento real del prototipo, disminuye el tiempo computacional y de igual manera satisface los criterios de convergencia.
- 7) Los perfiles de concentración de las especies químicas involucradas (propano, oxígeno, agua, dióxido de carbono, nitrógeno) siguen el contorno de la envolvente de la llama. La concentración de propano es máxima a la entrada de la cámara y comienza a disminuir dentro de la llama, en cuya región ocurre la combustión; fuera de la envolvente de la llama la concentración del propano es cero.
- 8) Los perfiles de temperatura son los esperados, debido al poco espacio disponible dentro de la cámara de combustión. La solución computacional se aproxima cualitativamente al comportamiento real del prototipo. Se observa que las zonas de recirculación coinciden tanto experimentalmente como computacionalmente.
- 9) La configuración geométrica de la cámara de combustión analizada es la menos conveniente, pues se genera una alta temperatura en las zonas de recirculación. Por lo que se sugiere incrementar las dimensiones de la cámara de combustión en la dirección de propagación de la llama.

REFERENCIAS

- [1] Escalante Herder, 2001. Trabajo de Grado: Simulación numérica de la distribución de temperatura, presión, velocidad y concentración de especies químicas en una cámara de combustión experimental. Universidad Nacional Experimental del Táchira.
- [2] García Francia., 2002. Trabajo de Ascenso. Simulación tridimensional de un flujo incompresible, estacionario y turbulento a través de una expansión súbita empleando el programa CFX 5.5. Universidad Nacional Experimental del Táchira.
- [3] CFX 5.6, 2002. "Master Contents". AEA Technology Engineering Software Ltd, Oxfordshire.